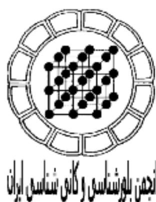
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی و یکم، شمارۀ دوم، تابستان ۱۴۰۲، از صفحۀ ۲۴۳ تا ۲۶۰



کانه‌سازی و چگونگی پیدایش کانسنگ غیرسولفیدی سرب-روی (-مس) چاه میله (شمال‌شرق انارک)، ایران مرکزی

بهزاد مهرابی[1]، نفیسه چقانه*[1]، ابراهیم طالع فاضل[2]

۱- گروه زمین شیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۵/۱۰، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۸/۱۱)

چکیده: کانسار سرب-روی (-مس) چاه‌میله با تناژ تقریبی یک میلیون تن و عیار ۲٫۱۵ درصد سرب و روی در کمربند فلززایی یزد- انارک پهنه ایران مرکزی، واقع است. کانی‌سازی سولفیدی اولیه شامل گالن، اسفالریت، کالکوپیریت و پیریت در واحد مرمر دولومیتی مجموعه چاه‌گربه به سن تریاس میانی رخ داده است. ماده معدنی اغلب با بافت‌های برشی، پرکننده فضای خالی، پراکنده و جانشینی شکل گرفته است. کانسنگ غیرسولفیدی کانسار چاه‌میله در اثر اکسایش برونزاد کانی‌های سولفیدی اولیه طی برهم‌کنش‌های پیچیده چون راندگی زمین‌ساختی، گسترش کارست، تغییرات سطح ایستابی و هوازدگی، در شرایط آب هوای گرم و خشک تشکیل شده است. مهمترین کانی‌های غیرسولفیدی کانسار چاه‌میله سروزیت، همی‌مورفیت، ولفنیت، میمتیت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت و اکسی- هیدروکسیدهای آهن هستند. در کانسار چاه‌میله، تشکیل اسیدسولفوریک و در نتیجه کاهش pH با اکسایش پیریت و سایر کانی‌های سولفیدی، افزایش فشار دی اکسید کربن (P_{CO2}) سیال‌ها در اثر خنثی‌سازی سیال‌های اسیدی با سنگ میزبان کربناتی، آزادشدن یون‌های سولفاتی و ته‌نشینی اکسی- هیدروکسیدهای آهن نقش مهمی در تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی دارند. در شرایط اسیدی موجود، فلز روی از منطقه اکسایش مهاجرت کرده و در مناطق دورتر به‌صورت کانی‌های کربناتی (چون اسمیت‌زونیت و کمتر هیدروزنسیت با توجه به مقادیر $P_{CO2(g)}$) ته‌نشین شده، درحالی‌که فلز سرب اغلب به‌صورت سروزیت در منطقه اکسایش ته‌نشین و یا به سطح آهن III اکسیدهای آبدار جذب شده است. براساس یافته‌های زمین‌شناسی، بافتی و کانی‌شناسی، کانسنگ غیرسولفیدی چاه‌میله را می‌توان از گروه کانسارهای غیرسولفیدی برونزاد، زیررده کانسارهای جانشینی مستقیم (کانسنگ سرخ) در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: *کانسارهای سرب و روی؛ غیرسولفیدی؛ برونزاد؛ ایران مرکزی؛ انارک؛ چاه‌میله.*

مقدمه

ذخایر غیرسولفیدی شامل مجموعه‌ای از کانه‌های اکسیدی روی (سرب) هستند که اغلب در ارتباط با تکامل برونزاد کانسنگ سولفیدی اولیه (چون ذخایر نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT)، جانشینی کربناتی، رسوبی- بروندمی (SEDEX)، نوع ایرلندی، رگه-ای و به‌طور ناچیز ذخایر اسکارن)، تشکیل می‌شوند [۱-۳]. همچنین، کانسارهای غیرسولفیدی در اثر فرایندهای درونزاد به-صورت ۱) جانشینی با کنترل‌کننده ساختاری [۴-۶]، ۲) عدسی‌های چینه‌سان در محیط‌های با درجه دگرگونی بالا [۷، ۸] و ۳) رخدادهای گرمابی [۹، ۱۰]، شکل می‌گیرند. در محیط‌های برونزاد، ذخایر غیرسولفیدی به سه زیررده جانشینی مستقیم (کانسنگ سرخ)، جانشینی سنگ دیواره (کانسنگ سفید) و نوع پسماندی و پرکننده کارست تقسیم می‌شوند [۱، ۲، ۱۱]. کانسارهای غیرسولفیدی جانشینی مستقیم با نام کانسنگ سرخ شناخته شده‌اند که در آنها فلزهای آزاد شده، به‌صورت محلی و به‌طور مستقیم در بخش بالایی کانسنگ سولفیدی اولیه به دام می-افتند. این زیررده غنی از اکسی- هیدروکسیدهای آهن (اغلب گوتیت و هماتیت)، همی‌مورفیت، سروزیت و هیدروزینسیت هستند و بیش از ۲۰ درصد روی، بیش از ۷ درصد آهن و مقادیر بالای سرب±آرسنیک دارند [۱۲، ۱۳]. کانه‌زایی

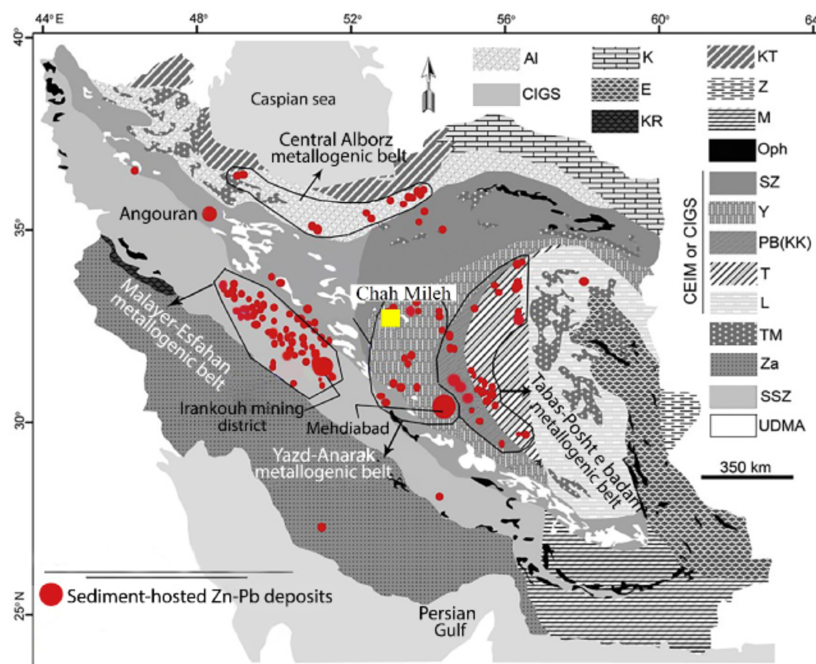
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۰۰۸۲۸۲۳۵، پست الکترونیکی: na.chaghane@gmail.com

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.3.6]

[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.243]

غیرسولفیدی نوع جانشینی سنگ دیواره اغلب با نام کانسنگ سفید شناخته می‌شود که در آن فلزها توسط آب‌های زیرزمینی پایین‌رو و شیب زمین‌شیمیایی از کانسنگ سولفیدی اولیه به سوی سنگ میزبان حمل می‌شوند [۱، ۲]. این کانسارها دارای اسمیت‌زونیت، هیدروزینسیت، به مقدار کم اکسیدهای آهن، کمتر از ۴۰ درصد روی، کمتر از ۷ درصد آهن و دارای تمرکز بسیار پایینی از سرب هستند [۹، ۱۲، ۱۴]. این ذخایر ممکن است به نسبت در نزدیکی کانسنگ اولیه و تا چند صد متر دورتر از آن تشکیل شوند. این زیررده به نسبت زیررده کانسنگ سرخ اغلب غنی از روی و فقیر از سرب است و از دیدگاه فلزکاری و محیط زیست برتری دارد [۲، ۱۲، ۱۳].

بیش از ۳۰۰ کانسار سرب- روی با سنگ میزبان رسوبی در ایران شناسایی شده‌اند که شامل ذخایر رسوبی-برونِدمی (SEDEX)، نوع ایرلندی و می‌سی‌سی‌پی (MVT) هستند [۱۵-۲۰]. در برخی از این کانسارها، کانی‌سازی از نوع برونزاد غیرسولفیدی است که بخش قابل‌توجهی از ذخایر سرب- روی ایران را تشکیل می‌دهند [۱۲، ۲۱، ۲۲]. مهمترین ایالت‌های فلززایی کانی‌سازی غیرسولفیدی در ایران شامل ایران مرکزی، پهنه سنندج- سیرجان و ناحیه البرز با سن پروتروزوئیک تا ترشیاری هستند [۲۱]. کانسارهای مهدی آباد با ۴۵٫۲ میلیون تن ذخیره غیرسولفیدی، انگوران با ۱۴٫۶ میلیون تن کانسنگ غیرسولفیدی و ایرانکوه با بیش از ۲۰ میلیون ذخیره سولفیدی و غیرسولفیدی غنی‌ترین ذخایر غیرسولفیدی روی و سرب ایران محسوب می‌شوند [۱۳، ۲۱، ۲۳]. کانسار سرب-روی (-مس) چاه-میله شامل نهشته‌های مزرعه‌دراز، کوه‌میله و سیلچو در فاصله ۳۰ کیلومتری شمال‌شرق انارک (ایران مرکزی) واقع است (شکل ۱) [۲۵،۲۴]. امکان کانی‌سازی فلزهای پایه در کانسار چاه‌میله برای نخستین بار در سال ۱۹۸۴ توسط کارشناسان روسی شرکت تکنواکسپورت (ژئومتال)، شناسایی شد. طی سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ فعالیت‌های اکتشافی از جمله تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰، حفر ۹ ترانشه به حجم ۵۰۶ مترمکعب، حفر ۵ گمانه اکتشافی با عمق‌های ۶۵ تا ۸۵ متر و تجزیه زمین-شیمیایی ۴۵۰ نمونه در منطقه توسط شرکت مهندسین مشاور کان‌آذین انجام شد [۲۶، ۲۷]. در این پژوهش، افزون بر معرفی ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و سنگ‌نگاری کانسنگ غیرسولفیدی چاه‌میله، چگونگی تشکیل کانسنگ ثانویه برونزاد چاه‌میله و عوامل کنترل‌کننده کانه‌زایی در آن بررسی شده است. توجه به چگونگی پیدایش و کانه‌زایی در این نوع کانسارها می‌تواند نقش مؤثری در معرفی و پی‌جویی ذخایر غیرسولفیدی فلزهای پایه در نواحی مشابه داشته باشد.

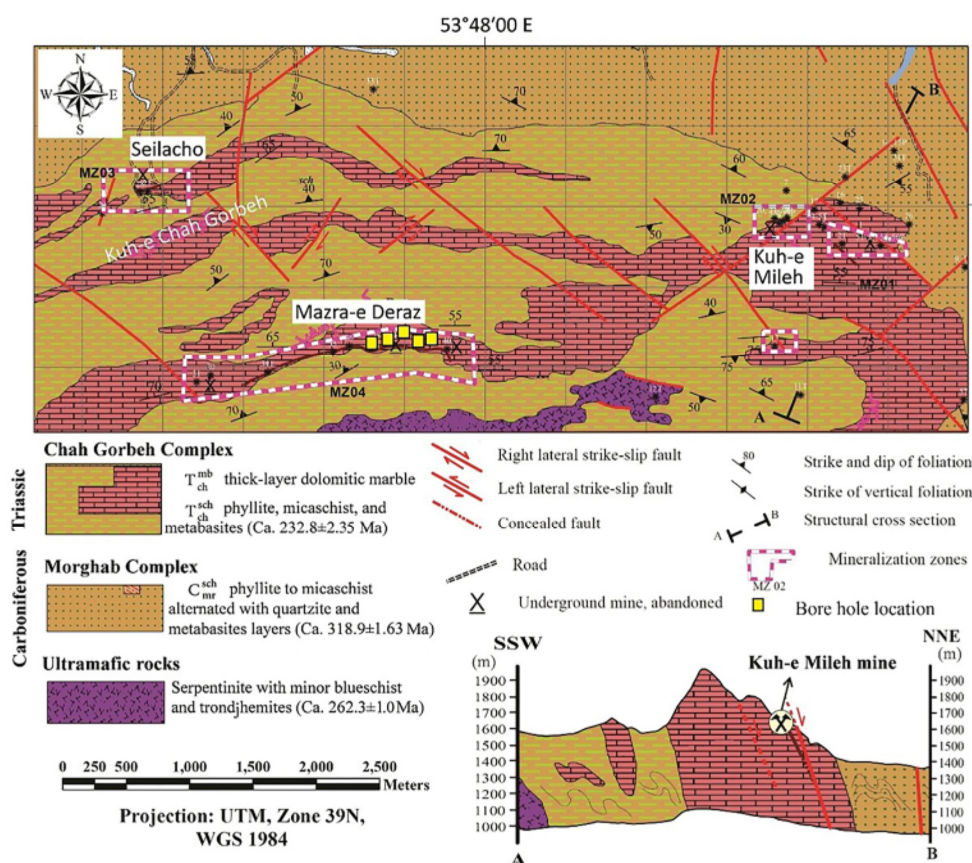


شکل ۱ توزیع ذخایر روی (سرب) با سنگ میزبان رسوبی در نقشه ساختاری ایران (برگرفته از مراجع [۲۴، ۲۵] با تغییرات) و موقعیت کانسار چاه‌میله در کمربند فلززایی یزد- انارک. (Al: پهنه البرز، CIGS: پهنه تدریجی زمین‌شناسی و ساختاری ایران مرکزی، E: گستره شرق ایران، K: کپه‌داغ، KR: زیر پهنه رادیولاریت‌های کرمانشاه، KT: پهنه ساختاری خزر- تالش- زیوه، L: قطعه لوت، M: پهنه مکران، Oph: کمربند افیولیتی، PB: قطعه پشت‌بادام، SSZ: پهنه سنندج- سیرجان، T: قطعه طبس، TM: سنگ‌های ماگمایی ترشیری، UDMA: کمان ماگمایی ارومیه- دختر، Y: قطعه یزد، Z: منطقه زابل، Za: کمربند زاگرس).

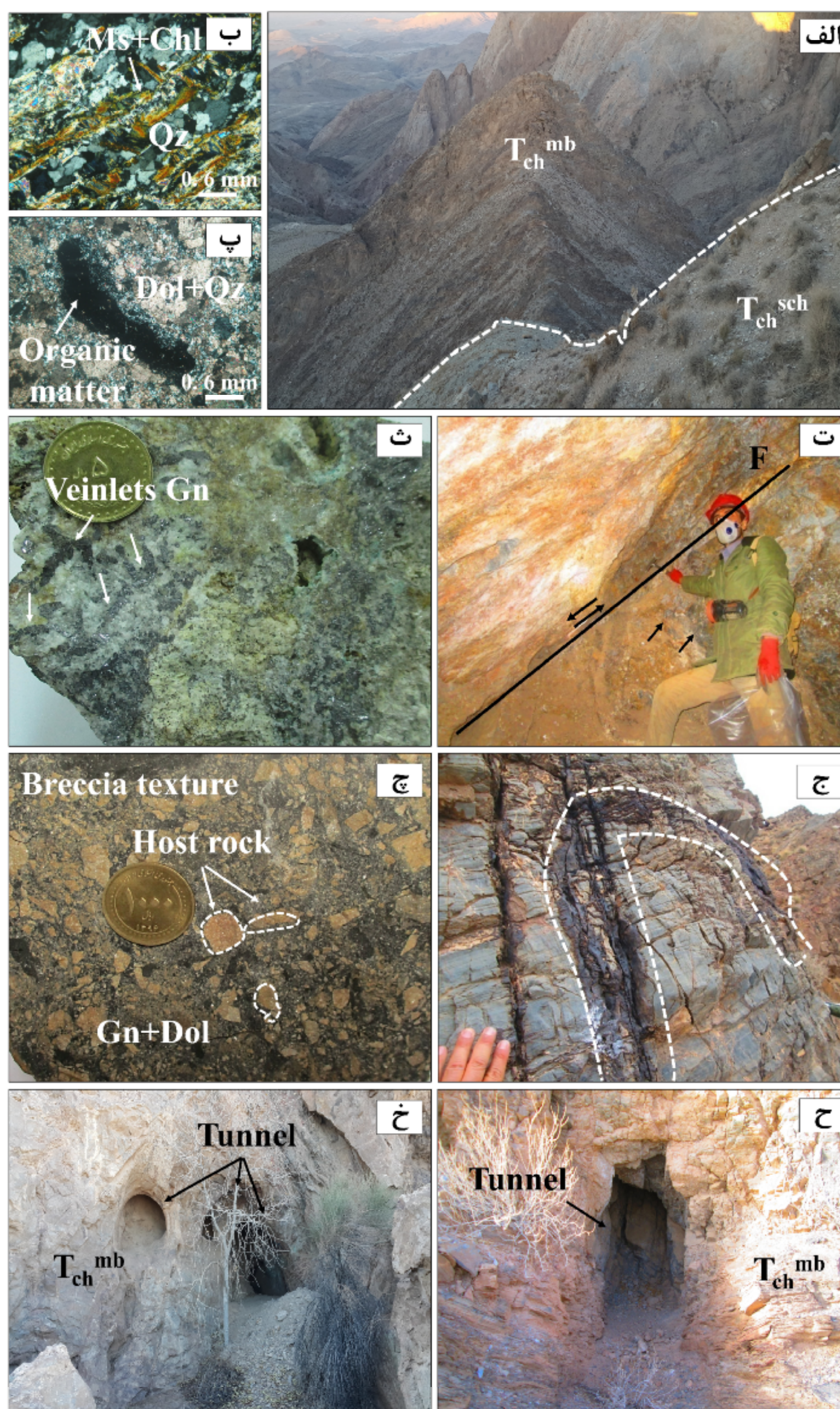
[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.3.6]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.243]

چینه‌شناسی و زمین‌شناسی ساختاری

کانسار چاه‌میله به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین معادن سرب- روی ایران، در فاصله ۳۰ کیلومتری شمال‌شرق انارک (استان اصفهان) و ۱۲ کیلومتری جنوب معدن سرب- روی نخلک، در رشته کوه‌های کوه‌میله- دم‌سفید- چاه‌گربه واقع است. براساس تقسیم‌بندی پهنه‌های رسوبی- ساختاری ایران توسط آقانباتی [۲۴]، منطقه چاه‌میله در غرب خرده قاره‌ی ایران مرکزی و قطعه یزد قرار دارد که بخشی از مجموعه دگرگونی انارک (شامل چند زیرمجموعه با رخدادهای دگرگونی و ساختاری ناهمگن [۲۸-۳۱]) را تشکیل می‌دهد. مهم‌ترین واحدهای سنگی در منطقه چاه‌میله از قدیم به جدید شامل مجموعه مرغاب، سنگ‌های فرامافیک و مجموعه چاه‌گربه هستند (شکل ۲). سنگ‌های فرامافیک شامل توالی از هارزبورگیت سرپانتینی و الیوین پیروکسنیت لایه‌ای هستند که در آن، توده‌های نفوذی پلاژیوگرانیت، کوارتزدیوریت، ترونجمیت، تونالیت و گابرو نفوذ کرده‌اند [۲۸، ۲۹]. مجموعه مرغاب مجموعه‌ای یکنواخت شامل فیلیت و میکاشیست متناوب با لایه‌های کوارتزیت و مرمرهای نازک لایه (C_{mr}^{sch}) بوده که سن آن بر اساس روش $^{40}Ar/^{39}Ar$ موسکوویت، حدود ۱/۶۳±۳۱۸/۹ میلیون سال تعیین شده است [۲۸]. مجموعه چاه‌گربه از دو واحد سنگی شامل ۱) فیلیت‌های غنی از کوارتزیت، سنگ‌های فرامافیک دگرگون‌شده (متابازیت‌ها) و میکاشیست (T_{ch}^{sch}) و ۲) مرمرهای دولومیتی ضخیم لایه (T_{ch}^{mb}) تشکیل شده است (شکل‌های ۳ الف و ب). سن شیست‌های مجموعه چاه‌گربه براساس روش $^{40}Ar/^{39}Ar$ بر استیلپنوملان ۲/۳۵±۲۳۲/۸ میلیون به‌دست آمده است [۲۸]. واحد مرمر دولومیتی ضخیم لایه، میزبان اصلی کانی‌سازی سولفیدی درونزاد در کانسار چاه‌میله است. از ویژگی‌های واحد مرمر دولومیتی، رخداد مواد آلی به‌صورت بی‌شکل در برخی از نقاط آن است (شکل ۳ پ). در کانسار چاه‌میله، شواهد عملکرد خطواره گسلی به‌صورت گسل‌های عادی و راستالغز با روند شمال‌شرقی- جنوب‌غربی، شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و شرقی- غربی دیده می‌شوند (شکل ۳ ت). همچنین، در جنوب مزرعه‌دراز، گسل‌های معکوس با راستای شرقی- غربی باعث رانده‌شدن واحدهای فرامافیک بر واحدهای جوان‌تر مجموعه چاه‌گربه شده است.



شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی ساده شده از کانسار چاه‌میله که در آن موقعیت نهشته‌های کوه‌میله، مزرعه‌دراز و سیلچو در میزبان مرمرهای دولومیتی مجموعه چاه‌گربه نشان داده شده است (برگرفته از مراجع [۲۶، ۲۷] با تغییرات).



شکل ۳ تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از واحدهای سنگی و گسل‌ها در کانسار چاه‌میله: الف) دید کلی از کانسار چاه‌میله و واحد سنگی موسکویت شیست (T_{ch}^{sch}) در کنار واحد مرمر دولومیتی (T_{ch}^{mb}) مجموعه چاه‌گربه (دید به شمال)، ب) موسکویت کلریت شیست و بافت‌های نماتوبلاستیک و گرانوبلاستیک (در نور قطبیده متقاطع، XPL)، پ) رخداد ماده آلی در سنگ میزبان کربناتی (XPL)، ت) کانی‌سازی سولفیدی در فرادیواره گسل عادی با روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب، ث) نمونه دستی از رگچه‌های متقاطع گالن در میزبان مرمر دولومیتی، ج) نمایی از رگه سولفیدی گالن- اسفالریت- پیریت، چ) نمونه دستی از کانسنگ برشی قطعه‌های سنگ میزبان کربناتی در یک سیمان دولومیت- گالن، ح و خ) تونل و گزنک‌ها (استخراج دنبال رگه) حفر شده در واحد مرمر دولومیتی مجموعه چاه‌گربه (T_{ch}^{mb}). نشانه‌های اختصاری کانی‌ها عبارتند از Chl: کلریت، Dol: دولومیت، Gn: گالن، Ms: مسکویت، Qz: کوارتز.

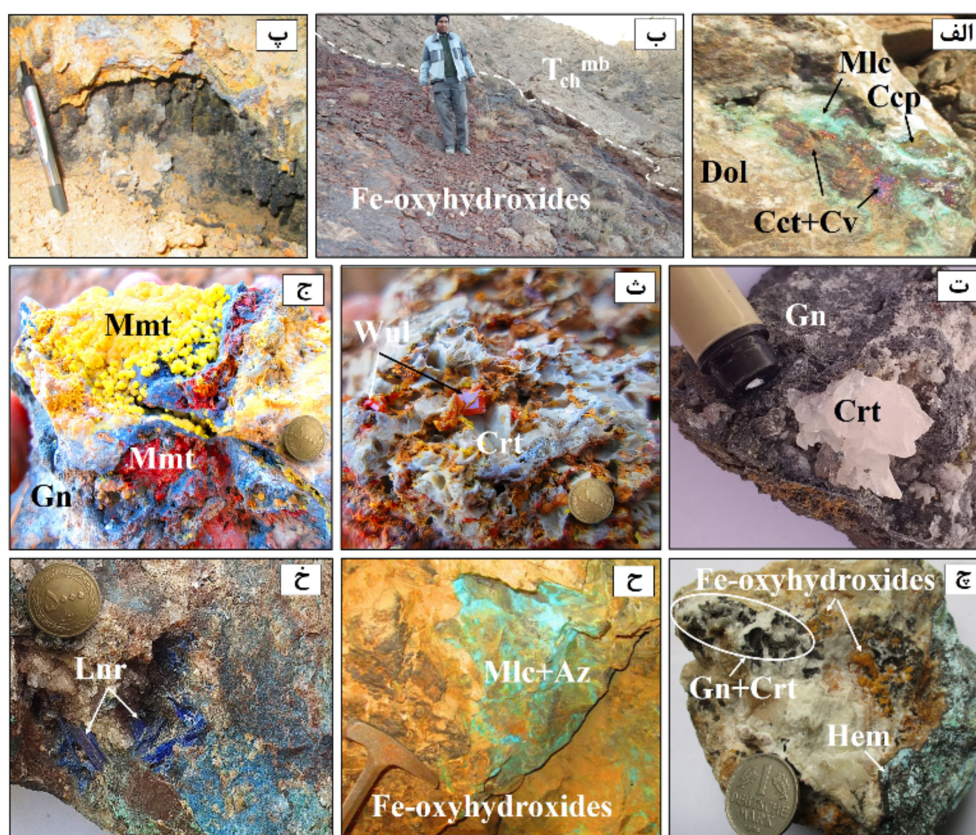
[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.3.6]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.243]

روش بررسی

پس از بازدیدهای صحرایی و نمونه‌برداری از بخش‌های مختلف کانسار (واحدهای کربناتی سنگ میزبان، کانسنگ فلزی و دگرسانی‌های همراه در رخنمون‌های سطحی، تونل‌ها، ترانشه‌ها و گمانه‌های اکتشافی)، در مجموع ۱۲۰ مقطع نازک، صیقلی و نازک- صیقلی برای سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری تهیه و با میکروسکوپ قطبشی نور بازتابی و عبوری زایس (مدل Axioplan2) در دانشگاه خوارزمی تهران، بررسی شدند. برای تکمیل بررسی‌های کانه‌نگاری و شناسایی کانی‌های غیرسولفیدی کمیاب، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) زایس همراه الگوی EDS در آزمایشگاه SEM دانشگاه خوارزمی تهران، استفاده شد. افزون بر آن، برای شناسایی کانی‌های غیرسولفیدی کمیاب و دگرسانی همراه، تعداد ۲۰ نمونه تا اندزه ریزتر از ۶۰ میکرون پودر شده و با طیف‌سنج پراش پرتو ایکس (XRD) فیلیپس مدل Xpert-pro با پرتوی Co Kα، (طول موج Å ۱٫۷۸۹۰۱۰)، ولتاژ ۴۰ kV و شدت جریان ۳۵ mA در بخش کانی‌شناسی مرکز تحقیقات فراوری مواد معدنی ایران (کرج)، بررسی شدند.

کانه‌زایی

کانسار سرب-روی (-مس) چاه‌میله (در سه ذخیره کوه‌میله، مزرعه دراز و سیلچو) با سنگ میزبان مرمر دولومیتی تریاس میانی دارای کانه‌زایی‌های سولفیدی درون‌زاد و سولفیدی و غیرسولفیدی برون‌زاد است. گسل‌های عادی و راستالغز با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و شمال‌شرقی- جنوب‌غربی کنترل‌کننده‌های اصلی کانه‌زایی در کانسار چاه‌میله هستند (شکل ۳ ت). ماده معدنی اغلب با بافت‌های برشی، پرکننده فضای خالی، پراکنده و جانشینی شکل گرفته است (شکل‌های ۳ ث، ج و چ و ۴ الف).

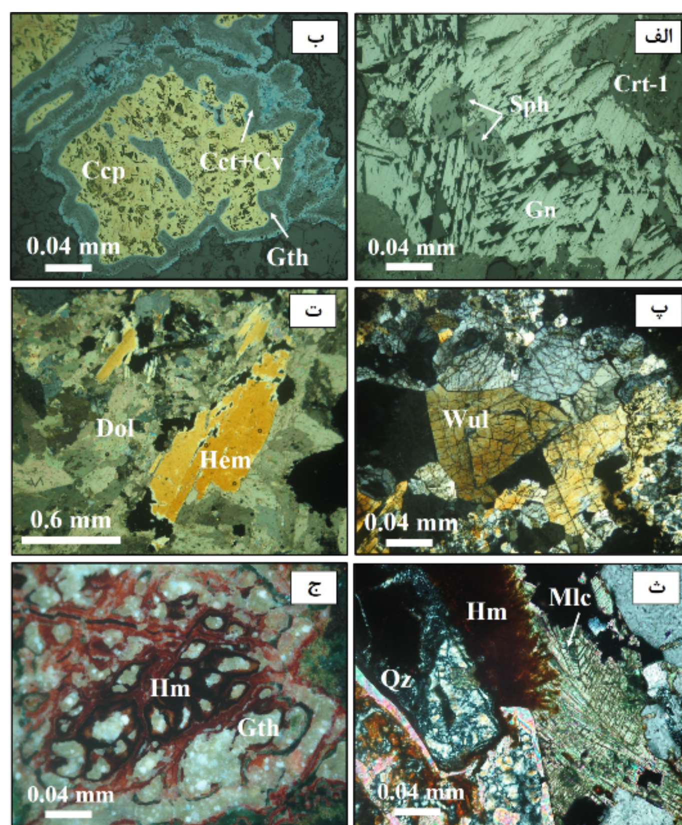


شکل ۴ تصاویر صحرایی و نمونه دستی از کانی‌های سولفیدی و غیرسولفیدی هدف در کانسار چاه‌میله: الف) بافت جانشینی در کالکوپیریت با رخداد کالکوسیت، کوولیت و مالاکیت، ب) مرز سنگ میزبان دولومیتی با کانی‌سازی غیرسولفیدی اکسی- هیدروکسیدهای آهن، پ) رخنمون‌های زرد تا صورتی از اکسایش گالن ناشی از تبدیل کانسنگ سولفیدی اولیه به کانسنگ غیرسولفیدی، ت) بلور آزاد سروزیت ناشی از اکسایش گالن، ث) بلور چاروجهی ولفنیت نارنجی همراه سروزیت، ج) بلورهای کمیاب میمتیت زرد و قرمز در سطح گالن اکسیده، چ) مجموعه درهمرشدی کانی‌های غیرسولفیدی همی‌مورفیت، سروزیت و اکسی- هیدروکسیدهای آهن، ح) مالاکیت و آزوریت همراه با اکسی- هیدروکسیدهای آهن، خ) بلورهای درشت و آبی رنگ لیناریت. (Az: آزوریت، Crt: سروزیت، Ccp: کالکوپیریت، Cct: کالکوسیت، Cv: کوولیت، Dol: دولومیت، Gn: گالن، Hem: همی‌مورفیت، Lnr: لیناریت، Mlc: مالاکیت، Mmt: میمتیت، Wul: ولفنیت).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.3.6]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.243]

دولومیتی و سیلیسی‌شدن از دگرسانی‌های اصلی در کانسار چاه‌میله بوده که اغلب با بافت برشی همراه هستند. کانه‌زایی بخش سولفیدی درونزاد مشابه با ذخایر نوع دره می‌سی‌سی‌پی (MVT) اغلب در بخش‌های زیرزمینی و تونل‌های منطقه دیده می‌شود (شکل‌های ۳ ح و خ) که شامل گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت هستند (شکل‌های ۵ الف و ب)، پس از تشکیل کانسنگ درون‌زاد، در نتیجه انحلال سولفیدهای دانه پراکنده موجود با آبهای جوی، در شرایط اسیدی و نفوذ این آبها از طریق گسل‌ها و شکستگی‌ها به ترازهای عمقی تا زیر سطح ایستابی (محیط احیاء)، فرایند غنی‌سازی برون‌زاد با تشکیل کانی‌های کالکوسیت و کوولیت رخ داده است (شکل‌های ۴ الف و ۵ ب).

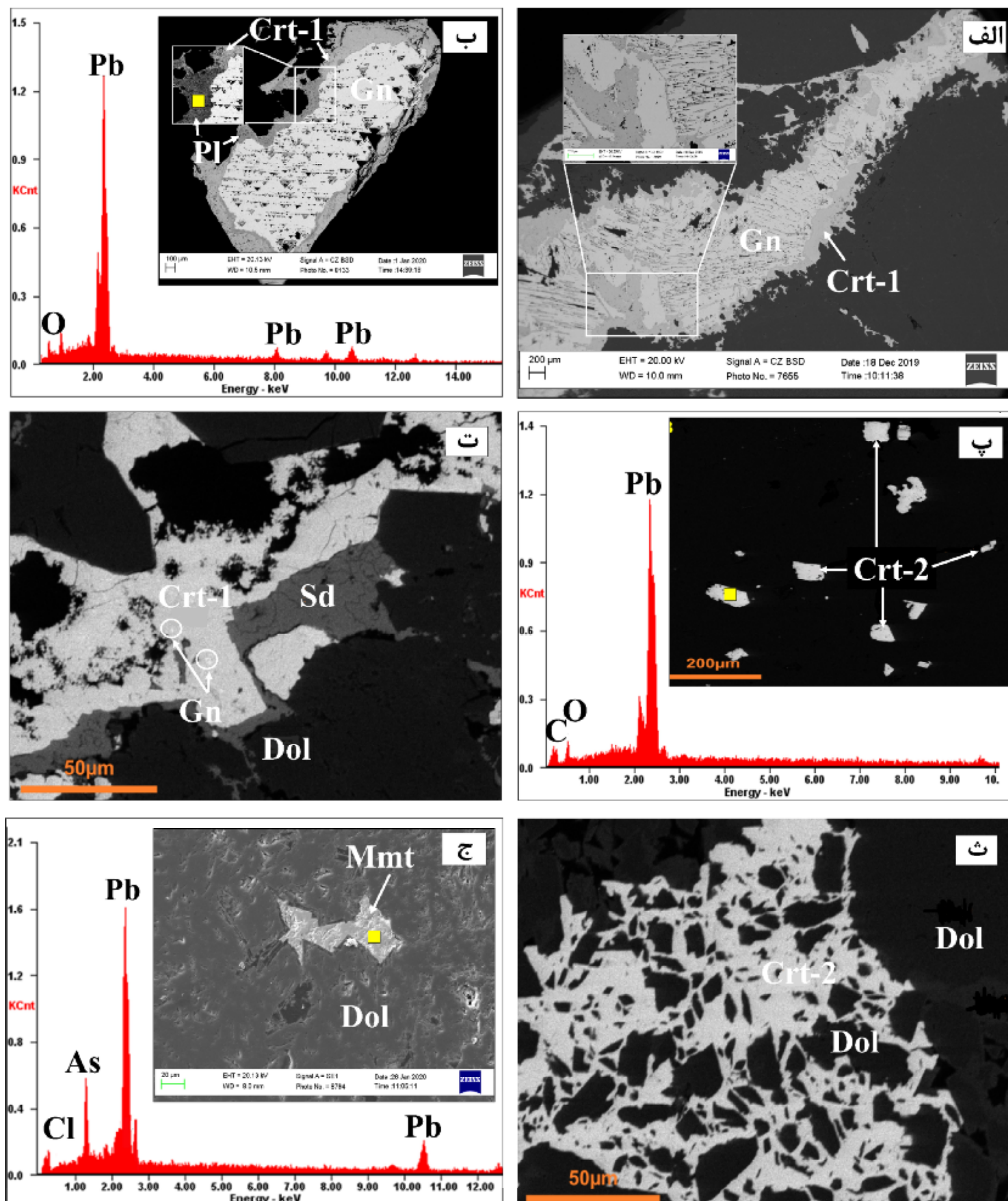
پس از تشکیل پهنه غنی‌سازی برون‌زاد، در نتیجه فعالیت‌های زمین‌ساختی و بالاآمدگی منطقه، سیال جوی کم‌دما پس از مهاجرت از سامانه‌های شکستگی و واکنش‌های شیمیایی جانشینی، بر کانسنگ سولفیدی درون‌زاد و غنی‌شده برون‌زاد اثر گذاشته است؛ سرانجام کانسنگ برون‌زاد اکسیدی- هیدروکسیدی با مجموعه‌ای از کانی‌های کربناتی (سروزیت، مالاکیت، آزوریت و اسمیت‌زونیت)، سیلیکاتی (همی‌مورفیت، ویلمیت و کریزوکلا)، کلریدی (میمتیت و آتاکامیت)، سولفاتی (لیناریت) و اکسی- هیدروکسیدی (لیتارژ، پلاتنریت، ولفنیت، کوپریت، هماتیت، گوتیت، مگنتیت و لیمونیت)، تشکیل شده است (شکل‌های ۴ ب- خ و ۵ پ- ج). تشکیل کانی‌های سولفیدی روی و سرب همراه با کانسنگ برونزاد در بیشتر ذخایر کشور مراکش رایج است [۳۲]. همچنین در کانسارهای غیرسولفیدی روی (سرب) در ایرلند، زامبیا [۳۳، ۳۴] و نامبیا [۳۵]، کانی‌های سولفیدی ثانویه گزارش شده‌اند. دولومیت و کوارتز فراوان‌ترین کانی‌های باطله در کانسار چاه‌میله هستند که به‌طور فرعی کلسیت، باریت، سیدریت و آنکریت را همراهی می‌کنند.



شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از کانی‌های سولفیدی و غیرسولفیدی هدف در کانسار چاه‌میله: الف) میانبار اسفالریت در گالن و رخداد سروزیت نوع اول در لبه گالن (در نور قطبیده صفحه‌ای، PPL)، ب) رخدادهای کانی‌های ثانویه کالکوسیت، کوولیت و مالاکیت در لبه کالکوپیریت (PPL)، پ) بلورهای خودشکل ولفنیت (XPL)، ت) رخداد بلورهای خودشکل همی‌مورفیت در سنگ میزبان دولومیتی (XPL)، ث) رخداد مالاکیت هرمی با بافت پرکننده فضای خالی و کوارتز نهان بلور کلسدونی (XPL)، ج) بافت مشبک هماتیت و جانشینی آن با گوتیت (XPL). نشانه‌های اختصاری کانی‌ها عبارتند از Crt: سروزیت، Ccp: کالکوپیریت، Cct: کالکوسیت، Cv: کوولیت، Dol: دولومیت، Gn: گالن، Gth: گوتیت، Hem: همی‌مورفیت، Hm: هماتیت، Mlc: مالاکیت، Qz: کوارتز، Sph: اسفالریت، Wul: ولفنیت.

سنگ نگاری کانسنگ غیرسولفیدی

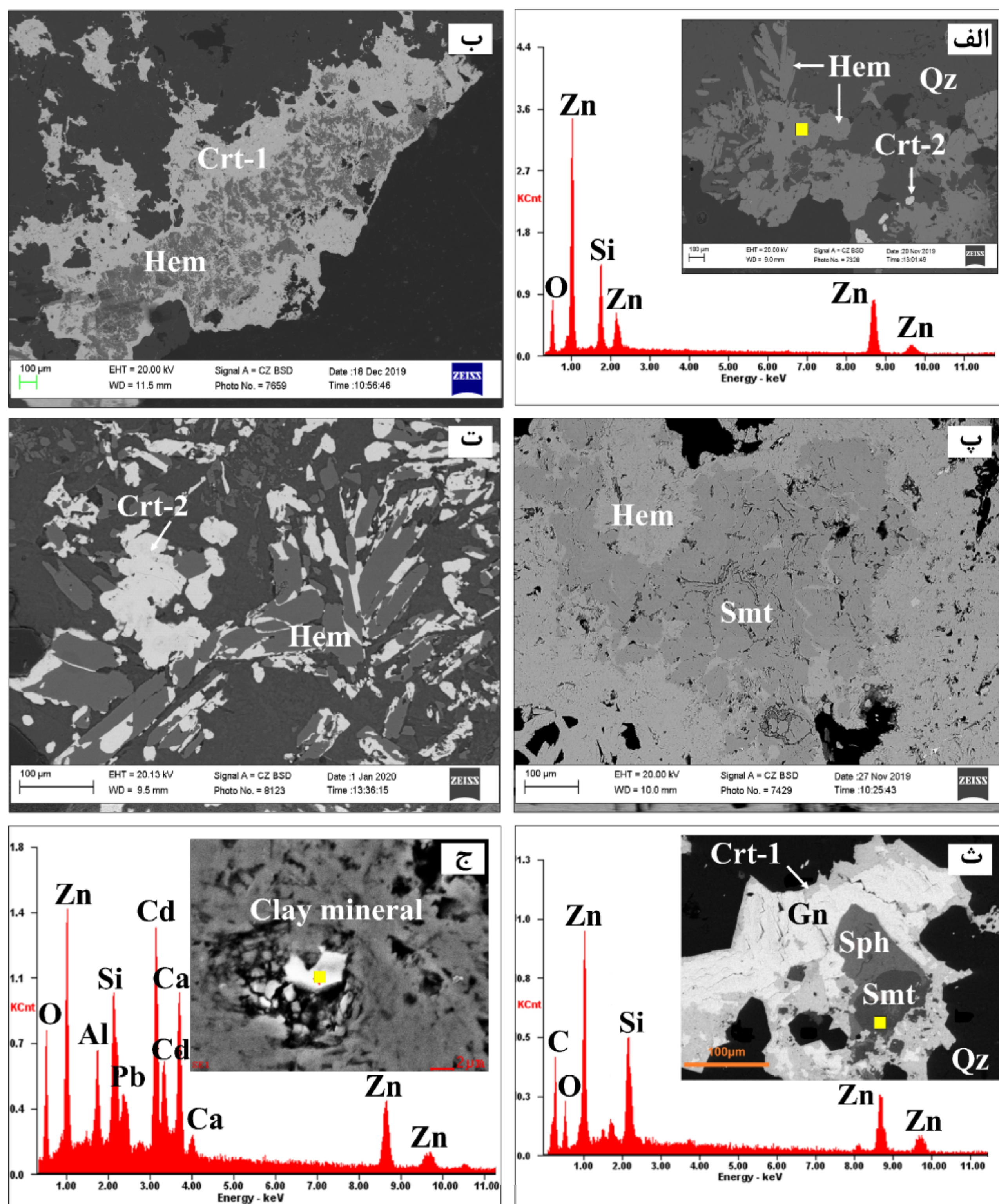
سروزیت ($PbCO_3$) فراوانترین کانی غیرسولفیدی سرب در کانسار چامیله است که در دو نسل شامل بلورهای ریز و رشته‌ای (Crt-1) با بافت جانشینی در گالن (شکل‌های ۵ الف، ۶ الف، ب و ت، ۷ ب و ث) و بلورهای درشت و اغلب منشوری (Crt-2) با بافت پرکننده فضای خالی و شکستگی‌ها در سنگ میزبان کربناته وجود دارد (شکل‌های ۶ پ و ث، شکل ۷ الف و ت و شکل ۸ ت). جانشینی گالن با سروزیت منجر به بافت‌های جانشینی متنوعی چون جانشینی خوردگی، کناره-ای، در راستای رخ، جزیره‌ای و اسکلتی شده‌است (شکل‌های ۶ الف، ب و ت و ۷ ث).



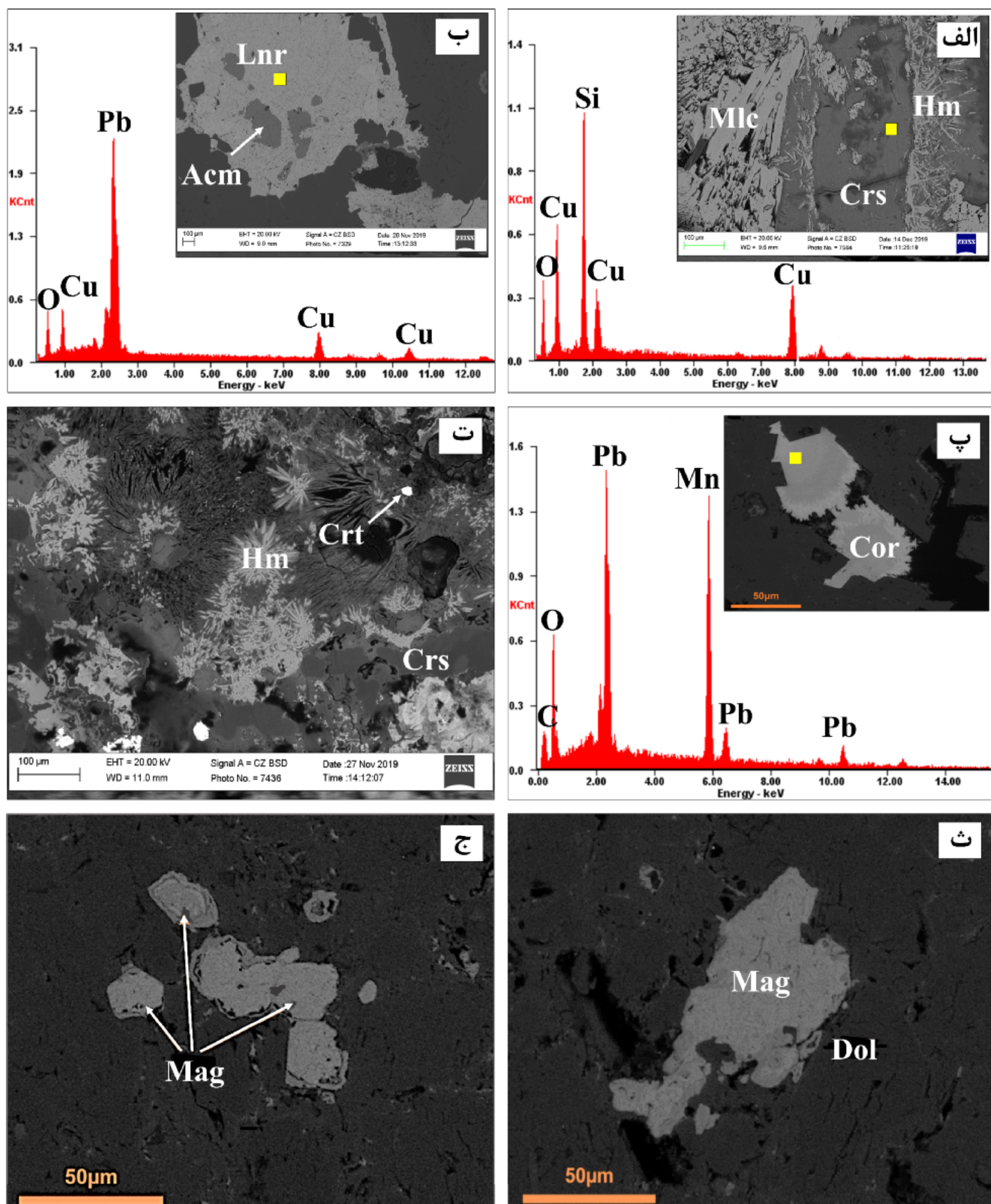
شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الگوی EDS از کانی‌های سولفیدی و غیرسولفیدی هدف در کانسار چامیله: الف) سروزیت نوع اول با بافت جانشینی در راستای شکستگی‌ها و رخ‌های گالن، ب) سروزیت نوع اول جانشینی همراه پلانتریت (الگوی EDS) در لبه گالن، پ) سروزیت درشت بلور نوع دوم با بافت افشان، ت) همراهی سیدریت و سروزیت نوع اول با آثاری باقیمانده از گالن، ث) بافت برشی شامل از سیمان سروزیت نوع دوم دربرگیرنده قطعه‌های دولومیت زاویه‌دار، ج) میمتیت حفره پرکن در میزبان دولومیت. (Crt: سروزیت، Dol: دولومیت، Gn: گالن، Mmt: میمتیت، Pl: پلانتریت، Sd: سیدریت).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.3.6]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.243]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.3.6]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.243]



شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الگوی EDS از کانی‌های سولفیدی و غیرسولفیدی هدف در کانسار چاه‌میله. الف) بلورهای خودشکل تیغه‌ای و صفحه‌ای همی‌مورفیت همراه سروزیت نوع دوم، ب) همی‌مورفیت همراه سروزیت نوع اول، پ) همی‌مورفیت و اسمیت زونیت در کنار هم، ت) درهمرشدی سروزیت نوع دوم و همی‌مورفیت، ث) اسمیت‌زونیت (الگوی EDS) با بافت جانشینی در اسفالریت همراه با بافت جانشینی سروزیت نوع اول در گالن، ج) کانی‌های رسی غنی از روی و کادمیوم (Crt: سروزیت، Gn: گالن، Hem: همی‌مورفیت، Qz: کوارتز، Smt: اسمیت‌زونیت، Sph: اسفالریت).



شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی همراه با الگوی EDS از کانی‌های سولفیدی و غیرسولفیدی هدف در کانسار چاه‌میله: الف) رخداد مالاکیت تیغه-ای همراه کریزوکلا (الگوی EDS) و هماتیت سوزنی، ب) میانبارهای آتاکامیت در لیناریت، پ) بلورهای نیمه‌شکل‌دار کرونادیت، ت) رخداد هماتیت سوزنی و سروزیت نوع دوم، ث) بلور منفرد مگنتیت، ج) بلورهای مگنتیت به‌صورت انباشتی. (Acm: آتاکامیت، Crt: سروزیت، Crs: کریزوکلا، Cor: کرونادیت، Dol: دولومیت، Hm: هماتیت، Mag: مگنتیت، Mlc: مالاکیت، Lnr: لیناریت).

گالن همراه با کربنات‌های آهن دار از جمله سیدریت (شکل ۶ ت) و یا اکسی-هیدروکسیدهای آهن و نیز همراه سروزیت در بافت برشی دولومیت دیده می‌شود (شکل ۶ ث). ولفنیت ($PbMoO_4$) در بررسی‌های صحرایی به‌همراه سروزیت و یا میمتیت با بافت پرکننده فضای خالی به‌صورت پولک‌های نارنجی و چاروجهی و در بررسی‌های میکروسکوپی با اندازه ۵۰ تا ۴۰۰ میکرون به‌صورت بلورهای تخته‌ای در برش طولی و به صورت شعاعی در برش عرضی دیده می‌شود (شکل‌های ۴ ث و ۵ پ). میمتیت ($Pb_5[Cl(AsO_4)_3]$) با رنگ‌های قرمز و یا زرد با شکل‌های شعاعی و تیغه‌ای، اغلب به‌صورت انباشتی در کانسنگ غیرسولفیدی برونزاد تشکیل شده است (شکل‌های ۴ ج و ۶ ج). همی‌مورفیت ($Zn_4[(OH)_2\text{-}Si_2O_7)\cdot H_2O]$) فراوان‌ترین کانی غیرسولفیدی و سیلیکاتی آبدار روی در کانسار چاه میله است که به‌صورت بلورهای خودشکل صفحه‌ای یا تیغه‌ای با اندازه ۲۰ تا ۲۰۰ میکرون (شکل‌های ۴ چ، ۵ ت، ۷ الف و ت)، میانبارهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار در گالن (شکل ۷ ب) و با بافت پوسته‌ای که در آن پوسته‌های همی‌مورفیت متناوب با پوسته‌های اسمیت‌زونیت هستند (شکل ۷ پ)، شناسایی شد. در برخی از مقاطع، سروزیت نوع دوم به‌صورت همرشدی در همی‌مورفیت‌های تیغه‌ای دیده می‌شود (شکل ۷ ت). اسمیت‌زونیت ($ZnCO_3$) به‌عنوان کانی رایج گاهی به‌صورت پراکنده و اغلب با بافت جانشینی در لبه اسفالریت تشکیل شده است (شکل‌های ۷ پ و ث). کانی‌های رسی غنی از روی به‌صورت پرکننده فضای خالی درون حفره‌های همی‌مورفیت و اسمیت‌زونیت قرار دارند (شکل ۷ ج). مالاکیت ($Cu_2(CO_3)(OH)_2$) و سپس آزوریت ($Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$) فراوانترین کانی‌های ثانویه اکسیدی مس در کانسار چاه‌میله هستند که رخداد مالاکیت اغلب با بافت پرکننده فضای خالی به‌صورت رگه- رگچه‌ای و شعاعی همراه با کانی‌های باطله و اکسی- هیدروکسیدهای آهن است (شکل‌های ۴ ح، ۵ ث و ۸ الف). افزون بر کانی‌های نام برده، کانی‌های غیرسولفیدی کمیاب سرب- روی- مس چون لیتارژ (PbO)، پلاتنریت (PbO_2؛ شکل ۶ ب)، لیناریت ($PbCu[(OH)_2\text{-}SO_4]$؛ شکل‌های ۴ خ و ۸ ب)، مندیپیت ($Pb_3Cl_2O_2$)، (کرونادیت $Pb(Mn^{4+}{}_6\, Mn^{3+}{}_2)O_{16}$؛ شکل ۸ پ)، هیدروزنسیت ($Zn_5[(OH)_3\text{-}CO_3]_2$)، ویلمیت ($Zn_2[SiO_4]$)، کریزوکلا ($CuSiO_3$+$nH_2O$؛ شکل‌های ۸ الف و ت)، آتاکامیت ($Cu_2Cl(OH)_3$؛ شکل ۸ ب) و کوپریت (Cu_2O) نیز در بررسی های میکروسکوپی و الگوهای پراش پرتو ایکس (شکل ۹) در کانسار چاه‌میله شناسایی شدند. مجموعه اکسی- هیدروکسیدهای آهن دیده شده در کانسار چاه‌میله شامل هماتیت، گوتیت و لیمونیت هستند. هماتیت به‌عنوان فراوان‌ترین کانی اکسیدی آهن در منطقه با بافت نواری، داربستی، افشان، مشبک (شکل ۵ ج)، سوزنی و شعاعی (شکل های ۵ ث و ۸ الف و ت) تشکیل شده است. مگنتیت به دو صورت افشان و انبوهه‌های بلوری با بافت پیوستگاه سه‌گانه در مقاطع میکروسکوپی دیده شد (شکل‌های ۸ ث و ج).

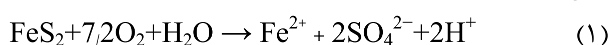
بحث

کنترل‌کننده‌های اصلی کانی‌سازی غیرسولفیدی

نقش کنترل‌کننده‌های ساختاری، زمین‌شیمیایی و سنگ-شناسی در شکل‌گیری کانی‌سازی غیرسولفیدی برونزاد روی (سرب) توسط بسیاری از پژوهشگران گزارش شده است [۱۱، ۱۲، ۳۶-۳۹]. تشکیل کانسارهای غیرسولفیدی روی (سرب) با میزبان کربناتی اغلب با عوامل مختلفی از جمله ترکیب کانسنگ اولیه، سنگ میزبان، فرایندهای تفریق فلز و جدایش و آب و هوا کنترل می‌شود که در ادامه اثر هر یک از آنها در شکل-گیری کانسنگ غیرسولفیدی کانسار چاه‌میله بررسی شده است.

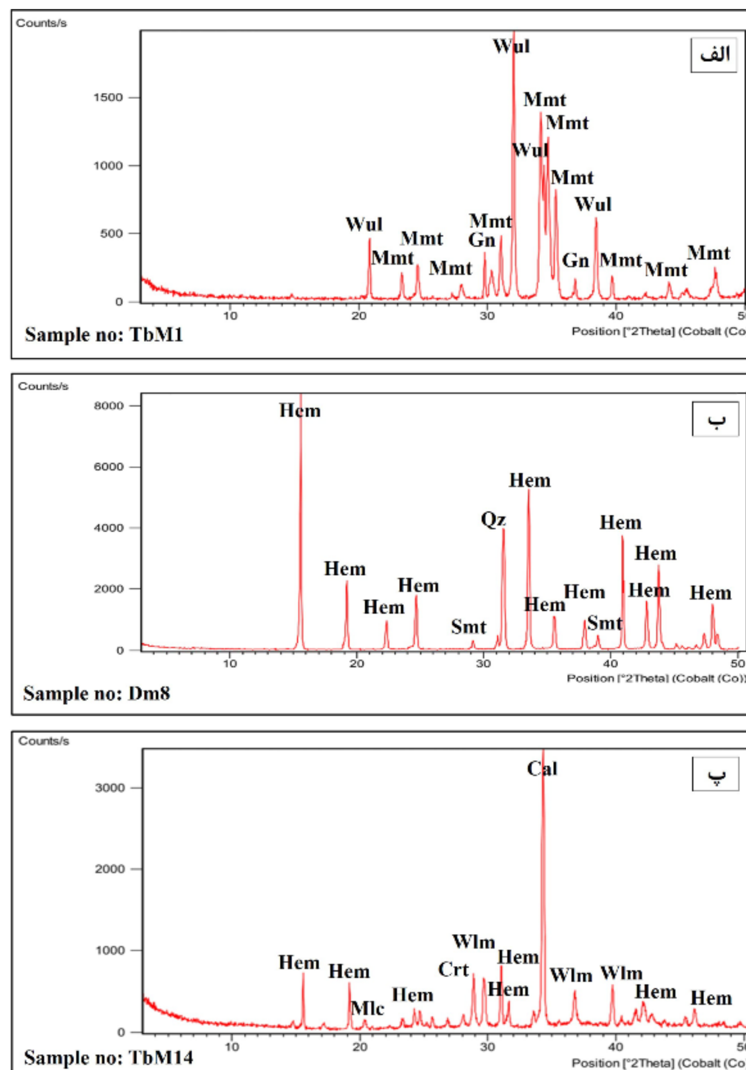
نقش پیریت و سایر سولفیدها در فرایندهای برونزاد

در حضور اکسیژن مولکولی و آهن سه ظرفیتی (به‌عنوان عامل اکسایش)، آمیزه‌ای از کانی‌های سولفیدی چون گالن، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت اکسید می‌شوند [۳۹، ۴۰]. فرایند اکسایش منجربه تخریب سولفید اولیه و تولید ترکیب‌های Fe^{2+}، Fe^{3+}، Pb^{+2}، Zn^{+2}، $Fe_2(SO_4)_3$ و H^+ و سرانجام تشکیل محلول‌های سولفات‌دار در یک محیط اسیدی می‌شود [۴۱، ۴۲]. در pH پایین (کمتر از ۴/۵)، آهن سه ظرفیتی، کانه پیریت را سریعتر از اکسیژن مولکولی اکسید می‌کند و بنابراین ممکن است عاملی مهم برای فرایندهای اکسایش سطوح عمیق اشباع نشده از اکسیژن در کانسنگ‌های سولفیدی اولیه باشد. درصورتی که اکسیژن مولکولی در برخورد به پوشش غنی از مواد آلی با تنفس میکروبی و اکسایش مواد آلی مصرف شود [۴۳]، اکسایش سولفیدها محدود به فعالیت میکروبی بی‌اکسیژن یا اکسایش پیریت با آهن سه ظرفیتی می‌شود. اکسایش پیریت توسط اکسیژن و آهن سه ظرفیتی به ترتیب با واکنش‌های زیر نشان داده شده است [۴۳]:


$$FeS_2+7/2O_2+H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-}+2H^+ \quad (۱)$$


$$FeS_2+14F^{+3}+8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-}+16H^+ \quad (۲)$$

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.3.6]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.243]



شکل ۹ الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) از کانی‌های غیرسولفیدی کانی‌ها شامل Cal: کلسیت، Crt: سروزیت، Gn: گالن، Hem: همی‌مورفیت، Qz: کوارتز، Smt: اسمیت‌زونیت، Mlc: مالاکیت، Mmt: میمتیت، Wlm: ویلمیت، Wul: ولفنیت.

در یک همبرزایی کانیایی شامل پیریت- اسفالریت- گالن، پیریت بیشترین میل به اکسایش و گالن کمترین میل را دارد. آهن می‌تواند تا ۱۵ درصد مولی جایگزین روی در ترکیب اسفالریت شود، این اسفالریت آهن‌دار به دلیل واکنش‌های آبکافت می‌تواند اسید اضافی تولید کند [۱۲]. حضور پیریت و اکسایش سریع آن در کانسار چاه-میله و در پی آن تشکیل اکسی- هیدروکسیدهای آهن، به‌دلیل تولید اسید، نقش مهمی در گسترش کانی‌سازی برونزاد دارند. اسیدهای تولید شده می‌توانند عناصر را انتقال داده و با کانی‌های کربناتی و سیلیکاتی واکنش دهند. از این میان، کلسیت و دولومیت مهم‌ترین کانی‌ها برای خنثی‌سازی اسیدها در کانسارهای سرب-روی با سنگ میزبان کربناتی چون کانسار چاه‌میله هستند. حفره-های انحلالی و قطعه‌های برشی برآمده از این فرایند در سنگ میزبان کربناتی، سبب افزایش نفوذپذیری و سهولت تحرک سیال اکسایشی فلزدار تولیدشده در کانسار چاه‌میله شده‌اند. گفتنی است که زره‌دارشدن (Armouring) سنگ میزبان کربناتی با سنگ گچ و یا اکسیدآهن آبدار (در کانسار چاه‌میله) می‌تواند واکنش‌های سریع خنثی‌سازی محلول‌های اسیدی را مهار کند که در ادامه توضیح داده شده است. واکنش اسید تولید شده با سنگ‌های میزبان کربناتی (واکنش‌های خنثی‌سازی) منجربه آزاد شدن یون‌های Ca^{+2}، Mg^{+2}، CO_3^{-2} و HCO_3^- در محلول می‌شود. این کاتیون‌ها و یون بی-کربنات با یون‌های فلزی چون Zn^{2+}، Pb^{+2} ، Mn^{+2}، Cd^{+2} پیوند داده و آنها را در کانی‌های ثانویه رسوب می‌دهند [۴۴، ۴۵]. ته-نشینی کانی‌های کربناتی و سولفاتی ثانویه به تحرک گونه‌های سرب و روی در محلول و همچنین شرایط محیطی چون pH و $P_{CO2(g)}$

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.3.6]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.243]

بستگی دارد [۳۶، ۳۷]. در کانسار چاه‌میله، عامل مهم دیگر در این مرحله وجود لایه نفوذناپذیر شیستی مجموعه چاه‌گربه و مرغاب در بخش کمرپایین کانسار چاه‌میله است (شکل ۳ الف) که سبب جلوگیری از فرار سیال‌های اکسایشی کانه‌دار از محیط می‌شود. چنین شستشوی کاملی منجربه تشکیل گوسان با اکسی-هیدروکسیدهای آهن (به‌ویژه گوتیت و هماتیت)، سروزیت، مقادیر کمتری از کانی‌های غیرسولفیدی روی به‌ترتیب فراوانی همی-مورفیت، اسمیت‌زونیت، هیدروزنسیت و کربنات‌های مس در کانسار چاه‌میله شده است. سازوکارهای جدایش و تشکیل دو نوع متمایز کانسنگ غیرسولفیدی روی (کانسنگ سفید و سرخ) به مقدار آهن یا حضور پیریت در کانسنگ اولیه سولفیدی بستگی دارد [۳۲]. کانسنگ سولفیدی بدون پیریت در اثر انحلال پیچیده، تحرک دوباره و فرایند بازته‌نشینی روی اغلب منجربه تشکیل کانسنگ سفید روی می‌شود. از سوی دیگر، کانسنگ سولفیدی شامل پیریت و اسفالریت که دستخوش فرایند اکسایش آهسته با آب فراوانی شده است منجربه گسترش پهنه کانسنگ سرخ روی می‌شود [۲۲]. بنابراین، فراوانی بالای اکسی- هیدروکسیدهای آهن (به‌ویژه هماتیت و گوتیت) نسبت به کانی‌های کربناتی و یا سیلیکاتی روی در کانسنگ غیرسولفیدی چاه‌میله می‌تواند بیانگر حضور پیریت در کانسنگ سولفیدی اولیه و تشکیل کانسنگ سرخ در کانسار چاه‌میله باشد.

نقش سنگ میزبان کربناتی، P_{CO2} و SiO_2

فشار بالای CO_2 پایداری اسمیت‌زونیت را به‌دلیل فعالیت یون‌های CO_3^{-2} و HCO_3^- در سیال‌های اکسیدشده افزایش می‌دهد. کمترین مقدار $P_{CO2(g)}$ برای تشکیل اسمیت‌زونیت حدود ۰/۴ kPa بوده که بالاتر از $P_{CO2(g)}$ جو است [۱۲، ۴۶]. در $P_{CO2(g)}$ بیش از kPa ۰/۴، هیدروزنسیت به‌جای اسمیت‌زونیت تشکیل می‌شود (واکنش ۳) [۳۶].

$$5ZnCO_3+3H_2O \leftrightarrow 2Zn_5(CO_3)_2(OH)_6 + 3CO_2 \qquad (۳)$$

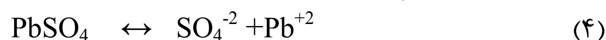
این شرایط برای سیال های در تعادل با جو، چون سیال‌های سطحی و یا نزدیک سطح در پهنه غیراشباع، بسیار رایج است و درصورتی‌که سیال های در سطوح ژرف و یا در بخش‌های اشباع از آب که با PCO2 جو تعادل ندارند، مناسب برای ته‌نشست اسمیت‌زونیت هستند [۱۲]. با این حال، به‌نظر می‌رسد که در آغاز فرایند برونزاد در سامانه کربناتی کانسار چاه‌میله، سیال‌های اسیدی به آسانی خنثی و بافر شده و CO_2(g) ناشی از انحلال سنگ میزبان کربناتی به محیط اضافه شده است. این امر منجربه افزایش موقتی $P_{CO2(g)}$ شده که در صورت نبود سیلیس، تشکیل اسمیت‌زونیت آغاز می‌شود [۱۲، ۴۷، ۴۸]. از دیگر منابع مهم تأمین گاز CO_2 برای تشکیل اسمیت‌زونیت، فرایندهای زیستی و اکسایشی مواد آلی است [۱۲]. در کانسار چاه‌میله، این عامل نیز به‌دلیل وجود مواد آلی (شکل ۳ پ)، در سنگ میزبان کانسار، ممکن است. تشکیل همی-مورفیت در پایان واکنش بین سیال‌های در گردش و سنگ میزبان کربناتی [۱۴] به تحرک بالای SiO_2 [۴۹] و یا احیای ظرفیت بافرکننده ناشی از انحلال سنگ میزبان کربناتی وابسته است [۲، ۳۲]. مقدار بالای همی‌مورفیت در بخش غیرسولفیدی کانسار چاه‌میله نشانگر منبعی برای سیلیکات بوده که برای تأمین این مقادیر کافی است. در مجموعه چاه‌گربه و مرغاب دو منبع سیلیس احتمالی برای تأمین این مقادیر وجود دارد: کانی‌های فیلوسیلیکاتی چون موسکویت و کلریت در سنگ بستر دگرگون‌شده (شکل‌های ۳ الف و ب) و نوارهای کوارتز و رسوب‌های دانه‌ریز سیلیسی چون کلسدونی در توالی میزبان و سنگ بستر دگرگون‌شده (شکل ۵ ث).

اهمیت فرایندهای تفریق فلز و جدایش

از قابل توجه‌ترین ویژگی‌های شکل‌گیری کانسارهای غیرسولفیدی سرخ و سفید روی، فرایند بسیار کارآمد جزبه-جزشدگی فلز یعنی جدایش است. فرایندهایی که به‌طور همزمان طی تشکیل انواع این کانسنگ‌ها رخ می‌دهند عبارتند از ۱) انحلال‌پذیری و پایداری کانی‌های مختلف سرب- روی، ۲) زره‌دارشدن کانی‌های کلسیت و گالن و ۳) جذب فلز به‌وسیله اکسید آهن سه ظرفیتی آبدار (HFO) [۱۲]. در مقایسه با گالن، سولفیدهای دیگر در مراحل پیشرفته اکسایش در پهنه اکسایش کانسنگ سولفیدی کمتر رایج هستند.

زره‌دارشدن گالن: نتایج کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی در کانسار چاه‌میله خوردگی و اکسایش ترجیحی پیریت و سپس اسفالریت را در مقایسه با گالن نشان می‌دهند. واکنش‌پذیری واقعی گالن نسبت به مقدار نظری زمین‌شیمیایی آن (گالن در مقایسه با اسفالریت پنج برابر واکنش پذیرتر است)، بسیار کمتر است [۵۰]. در سامانه‌های برونزاد، نوار نازکی از انگلزیت پیرامون گالن تشکیل می‌شود که دربردارنده میانبارهای فراوان گالن با اندازه کمتر از میلی‌متر است. انگلزیت در حضور یون‌های سولفات و در pH پایین ته‌نشین می‌شود و حلالیت پایینی به-ویژه در محلول‌های آبی دارای یون SO_4^{-2} دارد [۵۱]. انگلزیت یک لبه واکنشی (زره) روی گالن تشکیل می‌دهد که آن را از تماس مستقیم با محلول‌های اکسیدکننده محافظت می‌کند. تشکیل چنین لبه واکنشی نامحلول با ته‌نشینی انگلزیت در مقادیر pH پایین (اسیدی) شروع و با کربنات‌های سرب نامحلول چون سروزیت (به‌صورت سروزیت نوع اول در کانسار چاه‌میله، شکل‌های ۵ الف، ۶ الف، ب و ت، شکل ۷ ب و ث) یا

هیدروسروزیت که در کنترل $P_{CO2(g)}$ است، دنبال می‌شود [۱۲]. در شرایط قلیایی ضعیف، انگلزیت ناپایدار گردیده و Pb^{2+} آزاد شده است [۱۲] که در کانسار چاه‌میله پس از مهاجرت در حفره‌های سنگ میزبان به‌صورت سروزیت نوع دوم ته‌نشین شده‌اند (شکل‌های ۶ پ و ث، ۷ الف و ت، ۸ ت) [۱۲، ۵۱]:



$$PbSO_4 \leftrightarrow SO_4^{-2} + Pb^{+2} \quad (۴)$$



$$PbSO_4 + H_2CO_3 \leftrightarrow PbCO_3 + SO_4^{2-} + 2H^+ \quad (۵)$$

بنابراین، نبود انگلزیت در کانسنگ غیرسولفیدی برونزاد چاه-میله ممکن است با انحلال انگلزیت و یا جانشینی کامل انگلزیت با سروزیت توضیح داده شود. این فرایند زره‌دارشدن حضور (بقایای) گالن در کانسنگ‌های سولفیدی اکسید شده و همچنین در گوسان‌ها را توضیح می‌دهد [۵۲]. در کانسار چاه-میله، کانی و یا بقایای گالن همراه با کانسنگ غیرسولفیدی برونزاد به فراوانی دیده می‌شوند (شکل‌های ۴ پ- چ).

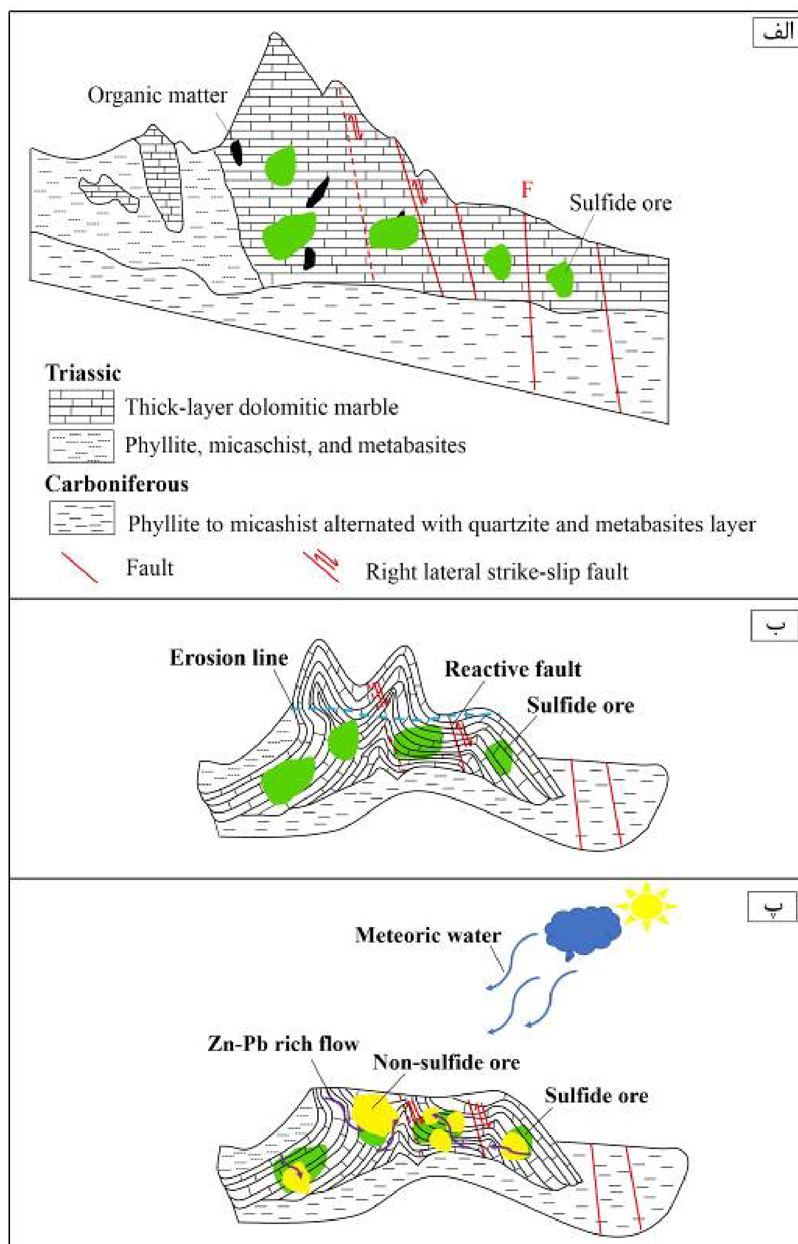
زره‌دارشدن کلسیت: اکسایش سولفیدها و زره‌دارشدن کلسیت منجربه ظهور یک منطقه اکسایش با pH پایین پایدار در گستره ۴ تا ۶ شده و واکنش خنثی‌سازی سریع سیال‌های اسیدی را در کربنات‌های میزبان مهار می‌کند [۱۳]. در سال-های اخیر بسیاری از پژوهشگران واکنش بین اسیدسولفوریک و کربنات‌ها و آثار پوشش‌های گچین بر سطح کلسیت را بررسی کرده‌اند [۵۳-۵۵]. افزون براین، سازوکار دیگر زره‌دارشدن کلسیت ته‌نشینی اکسی- هیدروکسیدهای آهن بر سطح آن بوده که هنوز به‌خوبی روشن نشده است. تفاوت در اثربخشی برای زره‌دارشدن کانی‌های کربناتی با پوشش‌های گچین یا اکسید آهن آبدار ناشی از خاستگاه زمین‌شیمیایی و چگونگی تشکیل هر دو نوع پوشش است. در اثر یک واکنش خنثی‌سازی، گچ نزدیک یا درست روی کربنات‌ها رسوب می‌کند، در حالی که اکسیدآهن آبدار باید به‌صورت ذرات نامحلول به سمت کلسیت منتقل شده تا برای زره‌دارشدن در دسترس باشد [۱۲]. در کانسنگ غیرسولفیدی چاه‌میله به‌دلیل نبود سنگ گچ، ممکن است مهار واکنش خنثی‌سازی در کربنات‌های سنگ میزبان ناشی از زره‌دار شدن کلسیت با اکسی- هیدروکسیدهای آهن باشد.

جذب فلز توسط اکسید آهن سه ظرفیتی آبدار: مس، کادمیوم، سرب، روی و آرسنیک می‌توانند توسط اکسی- هیدروکسیدهای آهن (گوتیت، فری هیدرات) جذب شوند و این فرایند با pH محلول آبگین کنترل می‌شود [۵۶، ۵۷]. رفتار شیمیایی و تحرک کاتیون‌های فلزی تا حد زیادی با تعاملشان با این اکسیدهای آهن کنترل می‌شود [۵۸]. میزان جذب سطحی سرب و روی فری هیدرات‌ها متفاوت است. چسبندگی کمی Pb^{2+} به فری هیدرات در pH برابر با ۵٫۵ به بیشترین مقدار خود می‌رسد [۵۹]، درحالی‌که جذب کمی فلز روی در pH بالاتر در گستره ۵٫۵ تا ۷٫۵ شروع می شود [۵۶]. در شرایط اسیدی یکسان، فلز سرب به‌صورت انگلزیت در منطقه اکسایش ته‌نشین و یا به سطح اکسیدهای آهن سه ظرفیتی آبدار جذب می‌شود، درصورتی‌که در همین شرایط، فلز روی در محلول آبگین متحرک باقی‌مانده و به مناطق دورتر مهاجرت می‌کند. بنابراین، محلول آبگین پایانی که پهنه اکسایش را ترک می‌کند، هنوز غنی از فلز روی (تا ٪۸۰ در pH=۶ و ٪۹۷ در pH =۵) و تهی از فلز سرب است. در ادامه، با مهار واکنش‌های خنثی-سازی اسیدها توسط زره‌دار شدن سنگ میزبان کربناتی با سنگ گچ و یا اکسی- هیدروکسیدهای آهن pH کمی افزایش یافته و در نتیجه فلز روی در بخش‌های عمیق‌تر سامانه برونزاد که اغلب بدون آهن سه ظرفیتی آبدار و هرگونه انبوهه قابل توجه فلز سرب است، ته‌نشین می‌شود [۱۲]. گفتنی است که افزایش pH موجب ناپایداری انگلزیت می‌گردد و بنابراین انگلزیت حل شده و یا با سروزیت جایگزین می‌شود. از این رو، جذب سطحی سرب و روی به‌وسیله اکسیدهای آهن سه ظرفیتی آبدار می‌تواند فرایند کلیدی برای جدایش و جزبه جز-شدگی سرب و روی در کانسنگ غیرسولفیدی غنی از آهن در کانسار چاه‌میله باشد.

اثر شرایط اقلیم بر رخداد کانسنگ غیرسولفیدی

اکسایش کانی‌های سولفیدی اغلب در محیط نزدیک به سطح زمین و در اثر شرایط آب و هوایی رخ می‌دهد [۱۲]. گفتنی است که شرایط آب و هوایی و وضعیت ساختاری و زمین‌ساختی منطقه چون خردشدن و کارستی‌شدن بر غلظت گازهای O_2 و CO_2 و در نتیجه تغییرات pH سیال برای حل‌کردن سنگ میزبان کربناتی اثر دارد. آب و هوا، اغلب اکسایش و انتقال فلز را با مقدار آب جوی و در دسترس بودن اکسیژن کنترل می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این نوع ذخایر در جهان در طیف گسترده‌ای از شرایط آب و هوایی شکل گرفته‌اند. مطلوب‌ترین شرایط برای تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی برونزاد آب و هوای گرم و خشک (مانند کانسار چاه-میله) با کمترین فعالیت زیستی در خاک است که در آن، بیشترین مقدار فلز برای انتقال توسط محلول‌های برونزاد در دسترس باشد [۱۲]. در محیط‌های خشک مانند چاه‌میله، گاز O_2 حل‌شده در سیال‌های جوی به بیشترین غلظت خود در مقایسه با سایر اقلیم‌ها می‌رسد و با فعالیت‌های زیستی درون خاک مصرف نمی‌شود [۱۲، ۲۱، ۲۳]. سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در آب و هوای خشک

اغلب پایین است و این منجربه بازشدن منافذ و درزه‌های پرشده آب پس از هر رخداد بارندگی شده و بنابراین یک جریان درونی از گازها (O_2 و CO_2) را در توده سولفیدی موجود فراهم می‌کند [۱۲، ۲۱، ۲۳، ۳۲]. این سامانه اغلب به‌دلیل فرایندهای انحلال (کارستی) سنگ میزبان کربناتی نفوذپذیر می‌شود. باتوجه به محدودیت دسترسی به آب در اقلیم خشک، سیال‌های تولید شده که طی فرایند اکسایش از روی و سایر فلزها بسیار غنی شده‌اند. این تمرکز بالای فلزها پیش‌نیاز تهنشینی مؤثر کانی‌های فلزها پایه غیرسولفیدی است. برای تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی برونزاد چاه-میله مدلی پیشنهاد شده که به‌طور طرحوار در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ مدل احتمالی تشکیل ذخیره غیرسولفیدی سرب- روی (-مس) کانسار چاه‌میله طی دگرگونی‌های زمین‌شناسی منطقه: الف) تشکیل ذخیره سولفیدی سرب-روی (-مس) چاه‌میله در واحد مرمر دولومیتی تریاس میانی شبیه ذخایر نوع دره می‌سی‌پی (MVT)، ب) پس از کانی‌سازی سولفیدی، منطقه چاه‌میله شرایط زمین‌ساخت فشاری را ثبت کرده که منجربه چین‌خوردگی، واکنش‌پذیری گسل، بالاآمدگی و فرسایش شده است، پ) نفوذ آب‌های جوی به درون سنگ میزبان کربناتی از طریق شکستگی‌ها، هوازدگی کانسنگ سولفیدی با اکسایش برونزاد، مهاجرت محلول‌های فلزدار، شکل‌گیری حفره‌های انحلالی و تشکیل کانسنگ غیرسولفیدی سرب-روی (-مس).

برداشت

کانسار سرب- روی (-مس) چاه‌میله با سنگ میزبان مرمر دولومیتی تریاس میانی دارای کانه‌زایی های درون‌زاد (سولفیدی) و برون‌زاد (سولفیدی و غیرسولفیدی) است. کانی‌های سولفیدی درونزاد شامل مقادیر زیاد گالن و به مقدار کمتر اسفالریت، کالکوپیریت و پیریت هستند. بافت غالب این بخش سولفیدی پرکننده فضای خالی، برشی و دانه پراکنده است. در کانسار چاه-میله، بالاآمدگی زمین‌ساختی به قرارگرفتن سولفیدها در معرض سطوح نزدیک اکسایش منجر شده و این امر برخورد سیال‌های جوی اکسایشی با کانی‌های سولفیدی را تسهیل می‌کند. در ادامه، اکسایش و جانشینی درجای (با انتقال محدود، به‌صورت محلی) سولفیدهای اولیه در اثر عملکرد و چرخش سیالات جوی در سنگ‌های کربناته، کانی‌سازی غیرسولفیدی را تشکیل می‌دهد.

مهمترین کانی‌های غیرسولفیدی منطقه چاه‌میله سروزیت، همی‌مورفیت، ولفنیت، میمتیت، اسمیت‌زونیت، مالاکیت و اکسی- هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت) هستند. با توجه به واکنش‌پذیری محدود گالن در پهنه اکسایش و ایجاد پوشش محافظ به‌وسیله سروزیت پیرامون آن، وجود این کانی سولفیدی در پهنه اکسایش کانسار چاه‌میله قابل توجیه است. فراوانی همی‌مورفیت نشان می‌دهد که سیلیس طی دگرسانی برونزاد متحرک بوده است و سیال‌های اسیدی ضعیف تولید شده از اکسایش سولفیدها و بافرشده با سنگ‌های کربناتی غنی از سیلیس منجربه ته‌نشینی همی‌مورفیت در این کانسار شده‌اند. فراوانی بیشتر اسمیت‌زونیت نسبت به هیدروزینسیت نشان‌دهنده فشار بالای CO_2 در زمان تشکیل کانسنگ برونزاد غیرسولفیدی است. وجود مواد آلی در سنگ میزبان کانسار چاه‌میله از منابع ممکن برای تأمین گاز CO_2 برای تشکیل اسمیت‌زونیت در این کانسار است. نوع سنگ‌شناسی میزبان (کربنات)، وجود کانسنگ سولفیدی اولیه غنی از فلزهای سرب- روی (-مس)، وجود سیال های جوی اکسیدی، بالاآمدگی ساختاری و شکننده پوسته در شرایط آب و هوایی گرم و خشک در چاه‌میله، باعث تشکیل مجموعه‌ای از کانی‌های غیرسولفیدی در مقیاس محلی در این کانسار شده است. با توجه به فراوانی بالای اکسی- هیدروکسیدهای آهن (به‌ویژه هماتیت و گوتیت) نسبت به کانی‌های کربناتی و یا سیلیکاتی روی، مقادیر بالای سرب به‌صورت سروزیت و وجود آثاری از کانی‌های سولفیدی اولیه از جمله گالن همراه با بخش غیرسولفیدی، می‌توان کانسنگ غیرسولفیدی چاه‌میله را از نوع ذخایر برونزاد با سنگ میزبان کربناتی، زیررده جانشینی مستقیم یا کانسنگ سرخ دانست.

قدردانی

نویسندگان از سازمان گسترش و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) برای فراهم‌کردن شرایط بازدید و عملیات نمونه-برداری از منطقه و حمایت‌های مالی برای انجام تجزیه کانی‌شناسی در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران سپاسگزارند. همچنین از داوران محترم مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران برای ارائه نظرات مفید و سازنده صمیمانه قدردانی می‌شود.

مراجع

[1] Heyl A.V., Bozion C.N., "*Oxidized zinc deposits of the United States, part I. General geology*", United States Geology Survey Bulletin 1135-A (1962) 52 pp.

[2] Hitzman M.H., Reynolds N.A., Sangster D.F., Allen C.R., Carman C.E., "*Classification, genesis, and exploration guides for nonsulphide zinc deposits*", Economic Geology 98 (2003) 685-714.

[3] Borg G., "*Geological and economical significance of supergene nonsulphide zinc deposits in Iran and their exploration potential*", In: Geological Survey of Iran (ed.) Mining and Sustainable Development, 20th World Mining Congress, Tehran, Iran, (2005) 385-390.

[4] Appold M.S., Monteiro L.V.S., "*Numerical modeling of hydrothermal zinc silicate and sulfide mineralization in the Vazante deposit, Brazil*", Geofluids 9 (2009) 96-115.

[5] Borg G., "*The influence of fault structures on the genesis of supergene zinc deposits*", Society of Economic Geologists Special Publication 14 (2009) 121-132.

[6] Slezak P.R., Olivo G.R., Oliveira G.D., Dardenne M.A., "*Geology, mineralogy, and geochemistry of the Vazante Northern Extension zinc silicate deposit, Minas Gerais, Brazil*", Ore Geology Reviews 56 (2014) 234–257.

[7] Brugger J., McPhail D.C., Wallace M., Waters J., "*Formation of willemite in hydrothermal environments*", Economic Geology 98 (2003) 819-835.

[8] Peck W.H., Volkert R.A., Mansur A.T., Doverspike B.A., "*Stable isotope and petrologic evidence for the origin of regional marble-hosted magnetite deposits and the zinc deposits at Franklin and Sterling Hill, New Jersey Highlands, United States*", Economic Geology 104 (2009) 1037-1054.

C-O-S-Pb isotopes and genesis of the Ahangaran Pb-Ag (Zn) deposit, Malayer-Esfahan Metallogenic Province, western Iran", Journal of Asian Earth Sciences 195 (2020) 104339.

[20] Maghfouri1 S., Choulet F., "*Ore-forming processes, O-C isotopes geochemistry, and fluid inclusions in the Darreh-Zanjir fault control MVT-type Zn-Pb deposit: Iran*", Arabian Journal of Geosciences 14 (2021) 2083.

[21] Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R., Rajabi A., Choulet F., "*A review of major non-sulfide zinc deposits in Iran*", Geoscience Frontiers 9 (2018) 249-272.

[22] Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R. Choulet F., "*Supergene nonsulfide Zn-Pb mineralization in the Mehdiabad world-class sub-seafloor replacement SEDEX-type deposit, Iran*", International Journal of Earth Sciences 109 (2020) 2531-2555.

[23] Reichert J., "*A Metallogenetic Model for Carbonatehosted Non-sulfide Zinc Deposits Based on Observations of Mehdi Abad and Iran Kouh, Central and Southwestern Iran*", Ph.D. Thesis, University of Martin Luther, Shillong, (2007) 129 pp.

[24] Aghanabati A., "*Geology of Iran*", Geological Survey of Iran, Tehran, (2004) 586 pp.

[25] Alavi M., "*Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz Mountains system in northern Iran*", Journal of Geodynamics 11 (1996) 1-33.

[26] Kan-Azin Mining Consultant Company., "*General exploration report of the iron at Mileh area in Anarak, Isfahan (Scale: 1:25000)*", Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization (Imidro), Tehran, Report 1 (2014) 438p.

[27] Kan-Azin Mining Consultant Company., "*General exploration report of the iron at Mileh area in Anarak, Isfahan (Scale: 1:5000)*", Iranian Mines and Mining Industries Development and Renovation Organization (Imidro), Tehran, Report 2 (2015) 214p.

[28] Bagheri S., Stampfli G.M., "*The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications*", Tectonophysics 451 (2008) 123-155.

[29] Sharkovski M., Susov M., Krivyakin B., "*Geology of the Anarak area (Central Iran): Explanatory text of the Anarak Quadrangle Map*

[9] Boni M., Gilg H.A., Balassone G., Schneider J., Allen C.R., Moore F., "*Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran*", Mineralium Deposita 42 (2007) 799-820.

[10] Boni M., "*Supergene Nonsulfide Zinc Ores :State of the Art*", Art Abstract at 21st General Meeting of the International Mineralogical Association, Sandton, South Africa, (2014).

[11] Borg G., "*A review of supergene nonsulphide zinc (SNSZ) deposits-the 2014 update*", In: Archibald S.M., Piercey S.J., (eds.) "*Current Perspectives of Zinc Deposits*", Irish Association for Economic Geology, Dublin, (2015) 123-147.

[12] Reichert J., Borg G., "*Numerical simulation and a geochemical model of supergene carbonate-hosted nonsulphide zinc deposits*", Ore Geology Reviews 33 (2008) 134-151.

[13] Reichert J., "*A geochemical model of supergene carbonate-hosted nonsulphide zinc deposits*", In: Titley S.R., (ed.) "*Supergene Environments, Processes, and Products*", Society of Economic Geologists, Special Publication 14 (2009) 69-76.

[14] Boni M., Mondillo N., "*The "Calamines" and the "Others": The great family of supergene nonsulfide zinc ores*", Ore Geology Reviews 67 (2015) 208-233.

[15] Rajabi A., Rastad E., Canet C., "*Metallogeny of Cretaceous carbonate hosted Zn-Pb Deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration*", International Geology Review 54 (2012) 1649-1672.

[16] Rajabi A., Rastad E., Canet C., "*Metallogeny of Permian-Triassic carbonatehosted Zn-Pb and F deposits of Iran: a review for future mineral exploration*", Australian Journal of Earth Sciences 60 (2013) 197–216.

[17] Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R., "*The early Cretaceous Mansourabad shale-carbonate hosted Zn-Pb (-Ag) deposit, Central Iran: an example of vent-proximal sub-seafloor replacement SEDEX mineralization*", Ore Geology Reviews 95 (2018) 20-39.

[18] Maghfouri S., Hosseinzadeh M.R., Choulet F., Lentz D.R., Tajeddin H.A., Movahednia M., Shariefi A., "*Nature of ore-forming fluids in the Mehdiabad world-class sub-seafloor replacement SEDEX-type Zn-Pb-Ba-(Cu-Ag) deposit, Iran; constraints from geochemistry, fluid inclusions, and O-C-Sr isotopes*", Journal of Asian Earth Sciences 207 (2021) 104654.

[19] Maanijou M., Tale Fazel E., Hayati S., Mohseni H., Vafaei M., "*Geology, fluid inclusions,*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.2.3.6]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.2.243]

Aznalcóllar mine (SW Spain)", Chemical Geology 190 (2002) 339-353.

[42] Pirajno F., Burlow R., Huston D., "*The Magellan Pb deposit, Western Australia; a new category within the class of supergene non-sulfide mineral systems*", Ore Geology Reviews 37 (2010) 101-113.

[43] Herbert R.B., "*Sulphide oxidation in mine waste deposits, a review with emphasis on dysoxic weathering. Mitigation of the environmental impact from mining waste (MiMi)*". MiMi Print, Lulea, Sweden, (1999).

[44] Pokrovsky O.S., Golubev S.V., Schott J., "*Dissolution kinetics of calcite, dolomite, and magnesite at 25 °C and 0 to 50 atm PCO_2*", Chemical Geology 217 (2005) 239-255.

[45] Pokrovsky O.S., Golubev S.V., Schott J., Castillo A., "*Calcite, dolomite and magnesite dissolution kinetics in aqueous solutions at acid to circumneutral pH, 25 to 150 °C and 1 to 55 atm P_{CO2}: new constraints on CO_2 sequestration in sedimentary basins*", Chemical Geology 265 (2009) 20-32.

[46] Kyle J.R., Ahn H., Gilg H.A., "*Nature and origin of the nonsulfide zinc deposits in the Sierra Mojada District, Coahuila, Mexico: constraints from regional geology, petrography, and isotope analyses*", Mineralium Deposita 53 (2018) 1095-1116.

[47] Arfè G., Mondillo N., Boni M., Balassone G., Joachimski M., Mormone A., Di Palma T., "*The Karst-Hosted mina grande nonsulfide zinc deposit, Bongara District (Amazonas Region, Peru)*", Economic Geology 112 (2017) 1089-1110.

[48] Arfè G., Mondillo N., Boni M., Joachimski M., Balassone G., Mormone A., Santoro L., Castro Medrano E., "*The Cristal Zn prospect (Amazonas region, Northern Peru). Part II: an example of supergene enrichments in tropical areas*", Ore Geology Reviews 95 (2018) 1076-1105.

[49] Moore J.M., "*Supergene mineral deposits and physiographic development in southwest Sardinia, Italy: Transactions institution mining and metallurgy*" Section B: Applied Earth Science 71 (1972) B59-B66.

[50] Zeman J., "*Supergene alteration of sulfides, II. A laboratory electrochemical study"*, Scripta Facultatis Scientiarum Naturalium Universitatis Purkynianae Brunensis, Geologia 15 (1985) 115-136.

[51] Faure G., "*Principles and Applications of Geochemistry, 2nd edition*", Prentice-Hall, New Jersey, (1998) 600 pp.

1:250000", Geological Survey of Iran, Tehran, Reports 19 (1984) 143 pp.

[30] Zanchi A., Zanchetta S., Garzanti E., Balini M., Berra F., Mattei M., Muttoni G., "*The Cimmerian evolution of the Nakhlak-Anarak area Central Iran and its bearing for the reconstruction of the historyof the Eurasian margin*", Geological Society London Special 312 (2009) 261-286.

[31] Zanchi A., Malaspina N., Zanchetta S., Berra F., Benciolini L., Bergomi M., Cavallo A., Javadi H.R., Kouhpeyma M., "*The Cimmerian accretionary wedge of Anarak, Central Iran*", Journal of Asian Earth Sciences 102 (2015) 45-72.

[32] Choulet F., Charles N., Barbanson L., Branquet Y., Sizaret S., Ennaciri A., Badra L., Chen Y., "*Non-sulfide zinc deposits of the Moroccan High Atlas: multiscale characterization and origin*", Ore Geology Reviews 56 (2014) 115-140.

[33] Taylor J.H., "*The formation of supergene galena at Broken Hill, northern Rhodesia"*, Mineralogical Magazine 31 (1958) 908-913.

[34] Terracciano R., "*Willemite mineralization in Namibia and Zambia*", Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italy, (2008) 178 pp.

[35] Borg G., Kärner K., Buxton M., Armstrong R., Schalk W.,"*Geology of the Skorpion non-sulphide deposit, southern Namibia*", Economic Geology 98 (2003) 749-771.

[36] Takahashi T., "*Supergene alteration of zinc and lead deposits in limestone*". Economic Geology 55 (1960) 1083–1115.

[37] Sangameshwar S.R., Barnes H.L., "*Supergene processes in zinc–lead–silver sulfides ores in carbonates*", Economic Geology 78(1983) 1379-1397.

[38] Williams P.A., "*Oxide Zone Geochemistry*", Ellis Horwood Ltd., Chichester, England, (1990) 286 pp.

[39] Balci N., Mayer B., Shanks III W.C., Mandernack K.W., "*Oxygen and sulfur isotope systematics of sulfate produced during abiotic and bacterial oxidation of sphalerite and elemental sulfur*", Geochimica et Cosmochimica Acta 77 (2012) 335-351.

[40] Heidel C., Tichomirowa M., Junghans M., "*Oxygen and sulfur isotope investigations of the oxidation of sulfide mixtures containing pyrite, galena and sphalerite*", Chemical Geology 342 (2013) 29-43.

[41] Domènech C., De Pablo J., Ayora C., "*Oxidative dissolution of pyritic sludge from the*

Student Research Symposium (GSSRS), Blacksburg, Virginia, (2004).

[56] Dzombak D.A., Morel F.M.M., "*Surface Complexation Modeling, Hydrous Ferric Oxide*", John Wiley and Sons, New York, (1990) 416 pp.

[57] Martinez C.E., McBride M.B., "*Cd, Cu, And Zn coprecipitates in Fe oxide formed at different pH: aging effects on metal solubility and extractability by citrate*", Environmental Toxicology and Chemistry 20 (2001) 122-126.

[58] Trivedi P., Dyer J.A., Sparks D.L., "*Lead sorption onto ferrihydrite. 1. A macroscopic and spectroscopic assessment*", Environmental Science and Technology 37 (2003) 908-914.

[59] Dyer J.A., Trivedi P., Scrivner N.C., Sparks D.L., "*Lead sorption onto ferrihydrite. 2. Surface complexation modeling"*, Environmental Science and Technology 37 (2003) 915-922.

[52] Jeong G.Y., Lee B.Y., "*Secondary mineralogy and microtextures of weathered sulfides and manganoan carbonates in mine wasterock dumps, with implications for heavy-metal fixation*", American Mineralogist 88 (2003) 1933-1942.

[53] Yanful E.K., Orlandea M.P., "*Controlling acid drainage in a pyritic mine waste rock. Part II-Geochemistry of drainage*", Water, Air and Soil Pollution Journal 124 (2000) 259-283.

[54] Wilkins S.J., Compton R.G., Taylor M.A., Viles H.A., "*Channel flow cell studies of the inhibiting action of gypsum on the dissolution kinetics of calcite: a laboratory approach with implications for field monitoring*", Journal of Colloid and Interface Science 236 (2001) 354-361.

[55] Huminicki, D.M., "*The effect of secondary precipitates on the dissolution rate of calcite in AMD solutions*", Abstract, 9th Annual Geoscience